

Étude expérimentale et numérique des mécanismes d'endommagement ductile et rupture des bords découpés des aciers avancés pour l'automobile

Résumé:

La performance mécanique des pièces de structures automobiles fabriquées à partir de tôles d'acier THR est souvent réduite à cause des bords découpés. Ce phénomène a été étudié pour deux nuances d'aciers ferrite-bainite (FB600) et ferrite-martensite (DP600), ce dernier présente un écrouissage et un gradient de dureté entre les phases plus élevés que ceux du FB600. Les micromécanismes d'endommagement de ces nuances ont été caractérisés en utilisant les techniques de tomographie in situ et MEB in situ. Pour le DP600, la germination de cavités a eu lieu sur les inclusions et aux interfaces ferrite-martensite. De plus, des cavités sous forme d'aiguilles ont été observées dans la zone centrale correspondant à la ligne de ségrégation. Les mêmes mécanismes de germination ont été observés dans le cas du FB600 en plus de la germination aux interfaces des carbures qui a eu lieu à des déformations élevées. L'analyse d'image a montré que le DP600 présente une densité initiale de cavités et une densité de cavités germées plus élevées que celles du FB600 qui semblait plus tolérant à l'endommagement. Des bords poinçonnés et usinés des nuances DP et FB ont été caractérisés par laminographie in situ lors d'un chargement mécanique. Pour les bords poinçonnés, ces observations ont permis de constater que la zone rompue est rugueuse et qu'un micro-endommagement sous forme d'aiguille initié sur la surface et dans le volume suit les lignes d'écoulement. Lors du chargement mécanique, les cavités sous forme d'aiguilles croissent à partir de la zone rompue et coalescent avec la zone cisailée. En revanche, pour les bords usinés, l'endommagement s'initie loin de la surface de bords ($\sim 800 \mu\text{m}$). Une analyse 3D a été réalisée pour quantifier l'état initial de l'endommagement et son évolution. Le FB600 a été plus résistant aux bords découpés que le DP600. Des simulations 3D par éléments finis ont été menés pour étudier les champs mécaniques potentiellement affectés par le profil du bord découpé et du pré-écrouissage. Cette analyse a permis de conclure que seuls ces paramètres ne modifient pas localement les champs mécaniques. Finalement, des simulations axisymétriques par éléments finis de l'essai d'expansion de trou ont été réalisées pour différentes épaisseurs de tôle en utilisant les critères d'endommagement identifiés sur les résultats expérimentaux de la tomographie in situ.

Mots clés: aciers DP et FB, endommagement ductile, rupture de bords découpés, tomographie/ laminographie à rayons X, simulation numérique

Experimental and numerical investigation of ductile damage mechanisms and edge fracture in advanced automotive steels

Abstract:

The mechanical properties of automotive structures made of AHS Steels is often seen reduced by the presence of cut edges. Here this phenomenon is investigated for ferrite-bainite steel (FB600) and martensite ferrite steel (DP600), the latter having higher work hardening and phase hardness contrast than FB600. Damage micromechanisms for these two base materials were assessed using in situ synchrotron tomography, in situ SEM and SEM on cross sections. It was revealed for the DP600 steel that damage nucleated from particles and ferrite-martensite interfaces. In addition, needle shaped voids, that are consistent with the presence of segregation lines, were seen. For the FB steel, the same observations hold true except that the decohesion on interfaces sets in at higher strains. Quantitative image analysis also showed that the initial number of voids and the number of nucleating voids was higher for DP steel than for FB steel which was also seen to be more damage tolerant. Punched and machined edges made of DP600 and FB600 steel were mechanically loaded during in situ laminography testing. It was found that the fracture zone of the punched edge was rough and that needle-shape voids at the surface and in the bulk followed material flow lines. During mechanical in situ testing the needle voids grew from the fracture zone surface and coalesced with the sheared zone. In contrast, for the machined edge the damage started away from the edge ($\sim 800 \mu\text{m}$) where substantial necking has occurred. Three-dimensional image analysis was performed to quantify the initial damage and its evolution. The FB600 was more resistant to cut edges than the DP600 steel. 3D elasto-plastic FE calculations were carried out to investigate mechanical fields, potentially affected by the edge profile and pre-hardening profile. These parameters were not found to substantially modify the mechanical fields. Finally, axisymmetric 2D simulations for hole expansion were carried out for different sheet thicknesses using a post-treated damage evaluation calibrated on in-situ tomography data.

Keywords: DP and FB steels, ductile damage, edge fracture, X-ray tomography/laminography, finite element simulation